第39卷 第1期
2022年1月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 1
Jan. 2022

气候变化下的塔里木盆地西南部内陆河流域径流组分特征分析

孙从建， 陈 伟， 王诗语

（山西师范大学地理科学学院，山西 太原 030000）

摘 要：气候变化对中亚高山区水循环影响显著，加剧了区域水资源供需矛盾。认识区域内陆河径流组分特征对于水资源管理具有重要意义。基于塔里木盆地西南部提孜那甫河流域过去60 a（1957—2016年）的气象、径流数据，分析了区域气候变化特征及径流组分的响应。结果表明：（1）过去60 a来，流域气温及山区降水呈现出明显的上升趋势，自2010年以来区域增温增湿趋势更为明显，这一变化下提孜纳甫河夏、秋季径流呈现显著增长。（2）径流分割结果显示：冰雪融水、地下水及降水对于年径流的贡献率分别为17%，40%及43%；不同的季节的径流组分差异明显，降水对流域夏季径流的贡献较为显著。作为塔里木盆地西南部典型的内陆河流，未来区域气候变化尤其是降水的变化将会对于提孜纳甫河水资源的可持续利用影响显著。

关键词：提孜纳甫河流域；气候变化；径流；同位素；径流分割；塔里木盆地

水资源作为人类生产生活必需的重要资源，对整个人类社会的可持续发展具有显著影响[1]。干旱内陆地区环境恶劣，水资源量匮乏，加之气候干旱、降水稀少、蒸发强烈，导致这一地区水资源的供需矛盾尤为突出[2-3]。过去的一个世纪以来，全球气候变化给中亚内陆河流域带来了显著的影响[3]。研究发现中国西北干旱内陆河流域对气候变化普遍响应明显，气候因子变化与径流变化表现出较为明显的相关性[3-5]。前人的研究指出，从20世纪80年代后期，整个干旱内陆地区气温上升明显[2]，伴随着气温的升高，以高山冰雪融水为重要补给来源的内陆河径流波动显著[3]，而降水的波动也进一步加剧了内陆河流域年径流的复杂化[2-6]，这些变化增加了区域水资源管理的难度。因此，系统的认识气候变化背景下干旱内陆河流域径流及其组分特征的变化已经成为国内外研究者关注的热点[7-8]。

解读河川径流对于气候因素的响应过程需要深入了解河川径流组分的特征，径流分割方法是研究径流中多种水体的混合组成比例的有效方法[5-12]，应用径流分割方法可以定量的计算河水的主要水源补给比例，从而研究流域径流过程。传统径流分割的方法包括图形法、时间步长法、电子滤波法、水文模型法、水量平衡法等，每种方法虽然各具优点，但由于无法通过实验对于径流分割和水源划分的结果进行科学论证，传统径流分割和水源划分的理论和方法之间仍存在较大的争议[6-8]。环境同位素技术作为一种新兴的水文学研究工具被广泛的应用于水文过程及气候方面的研究，应用环境同位素技术可以获取不同水体水力联系、混合比以及水汽来源等水循环信息[13-23]。自1970年以来同位素技术与径流分割方法首次结合之后，因其具备物理机制，可以有效的避免图形法等方法的主观性，获得了广泛的应用[22-27]。近年来，同位素径流分割方法与其他水文学研究方法相结合，形成了较完整的多水源的径流分割模型，同时开展了误差控制方面的研究[4]。然而，现有的同位素径流分割研究在西北地区开展较为缓慢[5-8]，已有的研究多集中在天山山区、河西走廊区的典型内陆河流域，而针对塔里木

收稿日期：2021-07-13； **修订日期：**2021-09-17
基金项目：国家自然科学基金项目（41901022）；新疆维吾尔自治区区域协同创新专项（上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划）（2019E01005）；新疆维吾尔自治区创新环境建设专项-天山青年计划（2019Q038）
作者简介：孙从建（1986-），男，教授，主要从事生态水文过程、资源评价研究. E-mail: suncongjian@sina.com

盆地西南部的研究涉及较少[12-14,28-30]。该区为我国两大地貌单元的交汇处,气候复杂多变,多条内陆河发源于此;同时该区域民族聚居,绿洲农业较为发达,水资源需求量较大,水资源供需矛盾显著,因此亟需开展关于该区域内陆河径流组分特征的研究。

选取塔里木盆地西南部提孜纳甫河流域作为典型研究区,基于过去60 a气温、降水等气象资料,分析区域气候变化的趋势;基于不同水体的稳定同位素观测数据,应用同位素径流分割模型分析了平水年径流的组成成分,探讨了气候变化影响下塔里木河西南部地区径流过程的响应机制,从而为整个区域水资源的利用及中亚水循环机理的研究提供重要的理论依据。

1 研究区概况

提孜纳甫河流域位于塔里木盆地的西南部,地理位置为36°31′~38°54′N,76°27′~79°04′E之间(图1),该河流发源于海拔5518 m的喀喇昆仑山北坡地区卡克拉克达坂,于喀什地区叶城县境内江卡水文站出山,流经叶城、莎车、麦盖提等县,最终汇入叶尔羌河,是塔里木河盆地南缘绿洲重要的水源[3]。提孜纳甫河流域平均海拔在3605 m,山区部分河流比降明显。流域落差较大,造就了差异明显的垂直气候;山区气温较低且降水较多(多年平均值为186.9 mm),属于典型的高山气候。而下游平原地区降水稀少(53.1 mm),干旱炎热,属于典型温带大陆性气候。提孜纳甫河全长335 km,其中出山口站——江卡站以上河段长约190 km,流域径流深度为165.2 mm[30]。

2 采样及测试分析

2.1 数据收集及样品的采集分析

气象水文数据:气象信息来自于中国气象科学数据共享服务网,水文数据来自于当地水文站(表1)。不同水体的水样均采自2016年(该年为平水年能较好的反映该河流的平均水平),具体样品采集信息如下:

降水样品:在江卡水文站开展,以次降水事件为单位,开展2016年全年降水的样品采集,共采集样品32份。其中雨水样品的采集要注意防止蒸发、避开污染源、避免阳光直接照射在采样器上、采样口离地面的距离不应小于1 m,同时要测量降水量。雪样的采集用桶式容器,常温下融化储存。

冰川及融雪水样品:冰川样品采集自喀喇昆仑山区的慕士塔格峰,采样时应避免只采集上层冰体,先用冰凿采取深层冰体,放入棕色玻璃瓶中融化保存。样品瓶用封口胶密封放入冰箱中,同时将冰箱调节到-4 ℃。融雪水样品采集自秋季及春季融雪期,在流域内部融雪发生地区采集。研究期共收集冰川及融雪水样品共计18份。

河水的采集:于2016年3—11月开展每5 d 1次的河水样品采集,共采集样品54份。选用的是垂直式取样器。水体采集后迅速的以封口膜密封放入保温箱中,同时记录当时的气温、湿度及地理坐标等要素。

地下水采集:选取位于流域内部江卡及库地的民用井,每月分别在2处民用井各采集1次样品,共采集地下水样品18份。

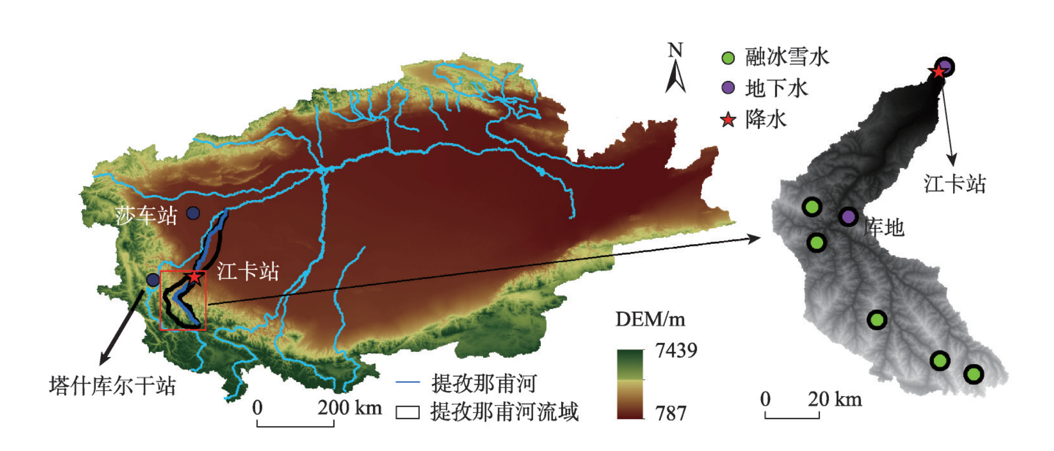


图1 提孜纳甫河流域位置及主要采样点分布示意图

Fig. 1 Terrain and sampling location of the Tizinafu River Basin in China

表1　研究区气象站及水文站基本参数

Tab. 1　Locations and data periods of the meteorological and hydrological stations

站点类型	名称	地理位置	地形	时间段
气象站	塔什库尔干	37°46′N, 75°14′E	山区(3091 m)	1957—2016年
	莎车	38°26′N, 77°16′E	平原(1231 m)	1957—2016年
水文站	江卡	37°44′N, 77°15′E	出山口(1504 m)	1974—2016年

水体的氢氧稳定同位素的测试在中国科学院荒漠与绿洲生态国家重点实验室进行，分析测试的仪器选用Los Gatos Research Inc激光光谱仪(简称LGR DLT-100)，其δD和$\delta^{18}O$的测试精度分别达到0.3‰和0.1‰。测定结果用V-SMOW表示。

2.2　径流分割

同位素径流分割经常用于二水源、三水源乃至多水源过程线分割。根据质量平衡方程和浓度平衡方程，可以将多水源同位素径流分割方法用下面公式表示[4,22-26]：

$$Q = \sum_{m=1}^{n} Q_m \tag{1}$$

$$QC_m^b = \sum_{m=1}^{n} Q_m C_m^b,\ b = l, \cdots, k \tag{2}$$

式中：Q代表多种水源补给形成的总径流量；Q_m代表第m种径流；C_m^b表示径流m的示踪剂b，其中需要指出的是参数C_m^b需要注意两点：第一，在观测期内C_m^b应为一个稳定的常量；第二，需要选用2种不同的示踪剂才能够避免误差。因此，在本项研究中我们选取$\delta^{18}O$和TDS作为2种不同的示踪剂。

3　结果与分析

3.1　气温的变化

提孜纳甫河流域过去60 a来气温呈现较为明显的上升趋势，增长趋势为0.30 °C·(10a)$^{-1}$(图2)。2个区域表现出不尽相同的变化趋势，山区气温上升较快，约为0.31 °C·(10a)$^{-1}$，而平原区气温的增长速率略小于山区，约为0.29 °C·(10a)$^{-1}$。本项研究的趋势显著性检测采用Mann-Kendall(M-K检验)非参数检测[5]。Mann-Kendall检验结果显示无论平原还是山区，其年平均气温都表现出显著的增长趋势($P<0.01$)，山区年平均气温在1987年发生突变，此后快速上升，这与整个新疆地区的气温突变点相吻合[2,5]。而平原区的年平均气温突变点出现在1996年(表2)。对比平原区气温与山区气温的变化发现，平原区的年均气温变化率要低于山区的年均气温变化，表明提孜纳甫河流域平原区的气温波动较大。

对比不同的季节，流域内山区的秋季气温增温最快，增长速度为0.44 °C·(10a)$^{-1}$。过去60 a中，平原区冬、春季的气温增速要明显的高于山区冬季的气温增速，而在夏季和秋季这一趋势是相反的，山区气温表现出更为显著的增速。尽管整个流域中春季的气温增速最为显著，但是其温度的波动也最大(C_v为2.29)，而夏季气温的年际波动最为平缓(C_v为0.03)(表2)。自2010年以来流域气温上升显著，其中2010—2016年间的平均气温较之多年平均上升1.10 °C，山区上升1.35 °C，这一增温趋势对于以冰雪融水为重要补给的干旱内陆河流具有重要影响。

3.2　降水量变化

Mann-Kendall检验结果显示山区降水表现出显著的增加趋势($P<0.05$)，增长率为7.30 mm·(10a)$^{-1}$[6.23%·(10a)$^{-1}$]，山区降水从1997年开始出现快速增长趋势(表2)。对比山区和平原区降水，发现平原区降水的波动性较大。

对比流域过去60 a不同季节的降水变化，山区夏季降水表现出最明显的增加趋势(图3)，增长率为4.95 mm·(10a)$^{-1}$，其次是平原区夏季降水，增长率为3.72 mm·(10a)$^{-1}$。而山区的春季降水表现出最缓慢的增加趋势，增加趋势仅为0.06 mm·(10a)$^{-1}$。自2010年以来，流域整体降水增加趋势较为明显，其中2010—2016年间其降水平均值较过去40多年年平均值增加了20 mm,山区增加趋势更为显著(增加了23.27 mm)。降水的增加很可能导致河川径流中降水补给来源的上升。

3.3　径流量变化

基于多年提孜纳甫河的出山口径流量，分析了该流域的径流变化特征，Mann-Kendall检验结果显示该区域径流在过去45 a来呈现出显著的增长趋

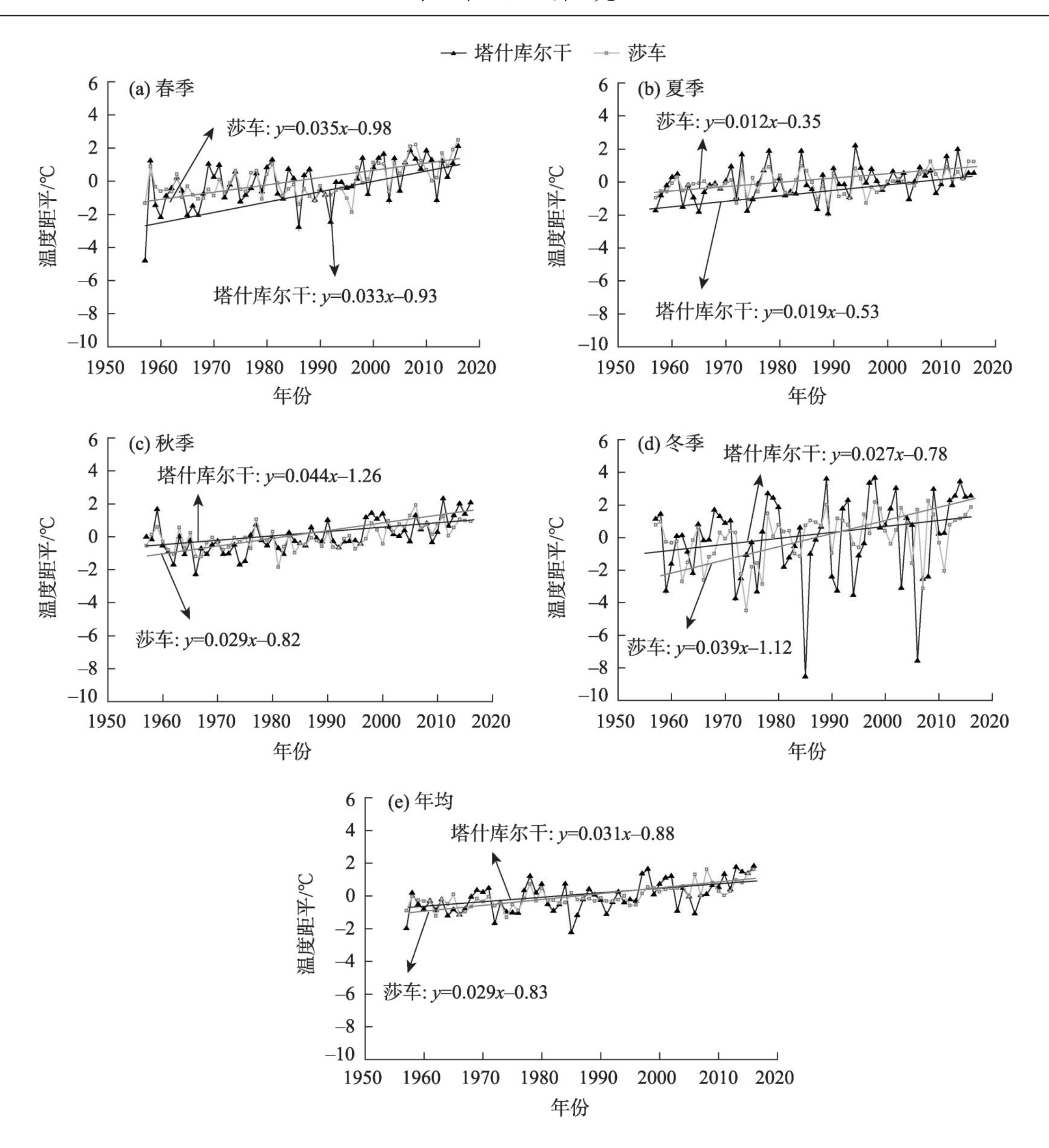


图2 过去50 a内平原区(莎车站)及山区(塔什库尔干站)不同季节气温距平变化

Fig. 2 Time series of temperature anomalies at plain (Shache) and mountain (Taxkorgan) stations in different seasons in the past 50 years

表2 提孜纳甫河流域过去50 a气温降水变化率及突变点统计

Tab. 2 Temperature and precipitation change rates and step change points in the past 50 years

位置	类型	气温			降水			
		C_v	比率/[℃·(10a)$^{-1}$]	突变点(年)	C_v	比率/[mm·(10a)$^{-1}$]	突变点(年)	比例/%
平原	年均	0.04	0.29	1996**	0.56	5.66	None	–
	春季	0.13	0.35	1996**	1.33	0.06	None	18
	夏季	0.03	0.12	None	0.80	3.72	None	63
	秋季	0.17	0.29	1997**	1.29	1.38	1974*	14
	冬季	0.25	0.39	1978**	1.51	0.50	None	5
山区	年均	0.24	0.31	1987**	0.32	7.30	1997**	–
	春季	2.29	0.33	1992**	0.74	1.19	None	14
	夏季	0.07	0.19	1993**	0.46	4.95	None	66
	秋季	0.23	0.44	1986**	0.92	0.69	None	12
	冬季	0.17	0.27	None	1.39	0.45	None	8

注:*表示在$P<0.05$水平上显著,**表示在$P<0.01$水平上显著。下同。

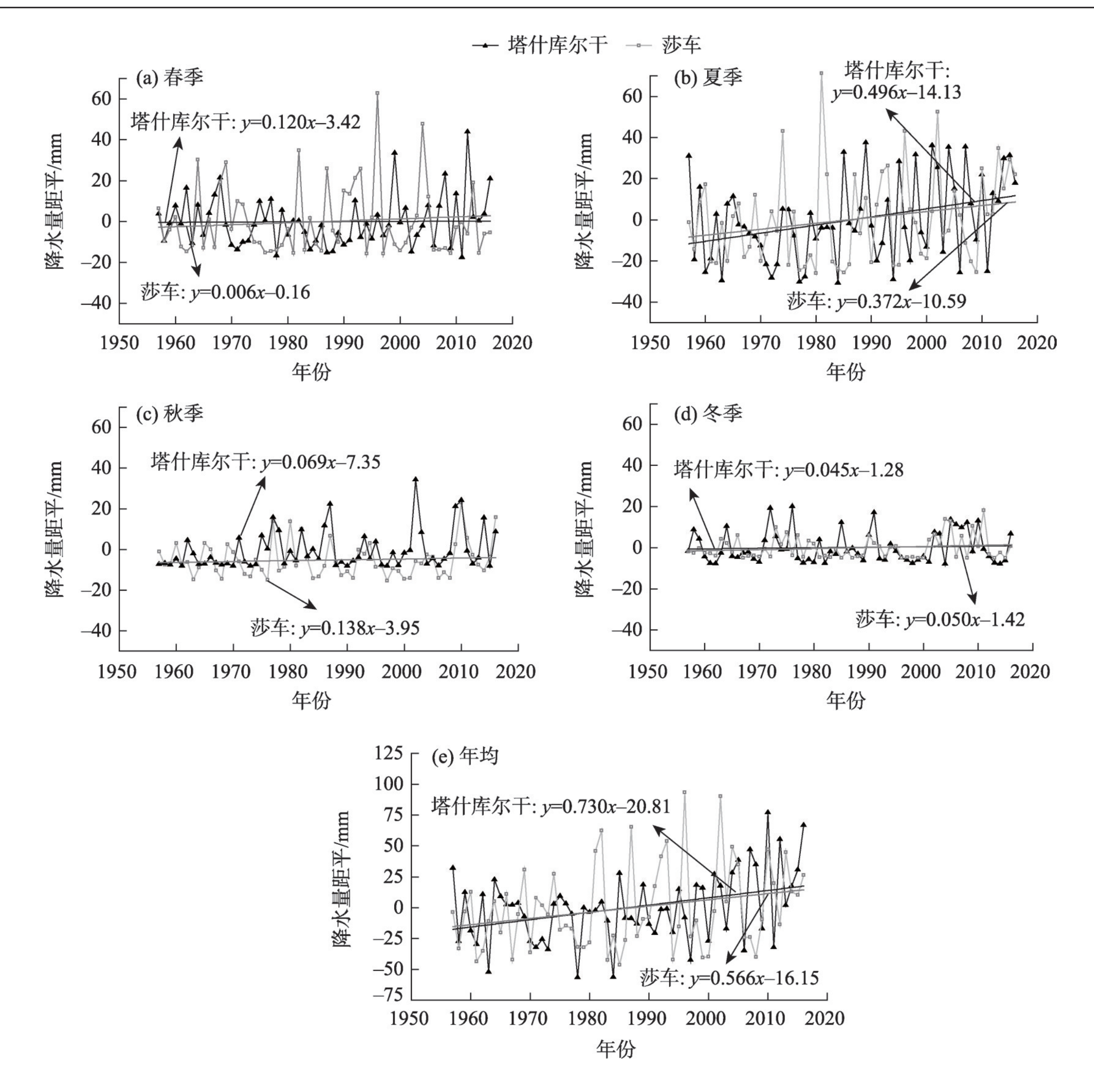


图3　过去50 a内平原区(莎车站)及山区(塔什库尔干站)不同季节降水量距平变化

Fig. 3　Time series of precipitation anomalies at plain (Shache) and mountain (Taxkorgan) stations in four seasons in the past 50 years

势,其在1998年发生突变并快速的增加。这与整个新疆地区的河流径流量的突变点(1993年)相对滞后[5],表明该流域所在的昆仑山北坡径流对于气候变化的响应要相对滞后于整个新疆地区。

对比不同季节径流的变化(图4),过去45 a以来,夏季径流的增长速度最快,为0.045×10^9 m^3·$(10a)^{-1}$[0.55%·$(10a)^{-1}$]。比较不同季节径流的年际变化发现,夏季径流的变差最小,而秋季径流的变差最大,其C_v值为0.34(表3)。

3.4　径流组分特征分析

3.4.1　不同水体的稳定同位素及水化学特征　水化学分析的结果显示,提孜纳甫河流域降水的矿化度相对较低,其TDS(矿化度)的取值范围为70~130 mg·L^{-1}(表4)。HCO_3^-是主要的阴离子,而Ca^{2+}是主要的阳离子。地下水的TDS取值范围为715~740 mg·L^{-1}(表4);SO_4^{2-}和Cl^-是主要的阴离子,而Ca^{2+}和Na^+是主要的阳离子。融冰雪水的TDS取值范围为150~174 mg·L^{-1}(表4);HCO_3^-和Cl^-是主要的阴离子,而Ca^{2+}和K^+是主要的阳离子。河水的TDS取值范围为370~410 mg·L^{-1}(表4);SO_4^{2-}和Cl^-是主要的阴离子,而Ca^{2+}和Na^+是主要的阳离子。

不同水体稳定同位素的监测结果表明,江卡站降水$\delta^{18}O$的取值范围为−27.00‰~7.00‰,其加权平均值为−13.33‰,季节变化可以清楚的在该流域显示,其降水的$\delta^{18}O$表现为7、8月较为富集,而冬季较为贫化(表4)。从表4结果可以看出,提孜纳甫河流域春秋季(3月和10月)的融冰雪水的稳定同位素含量高于夏季(7、8月)。地下水的$\delta^{18}O$和δD在春季表

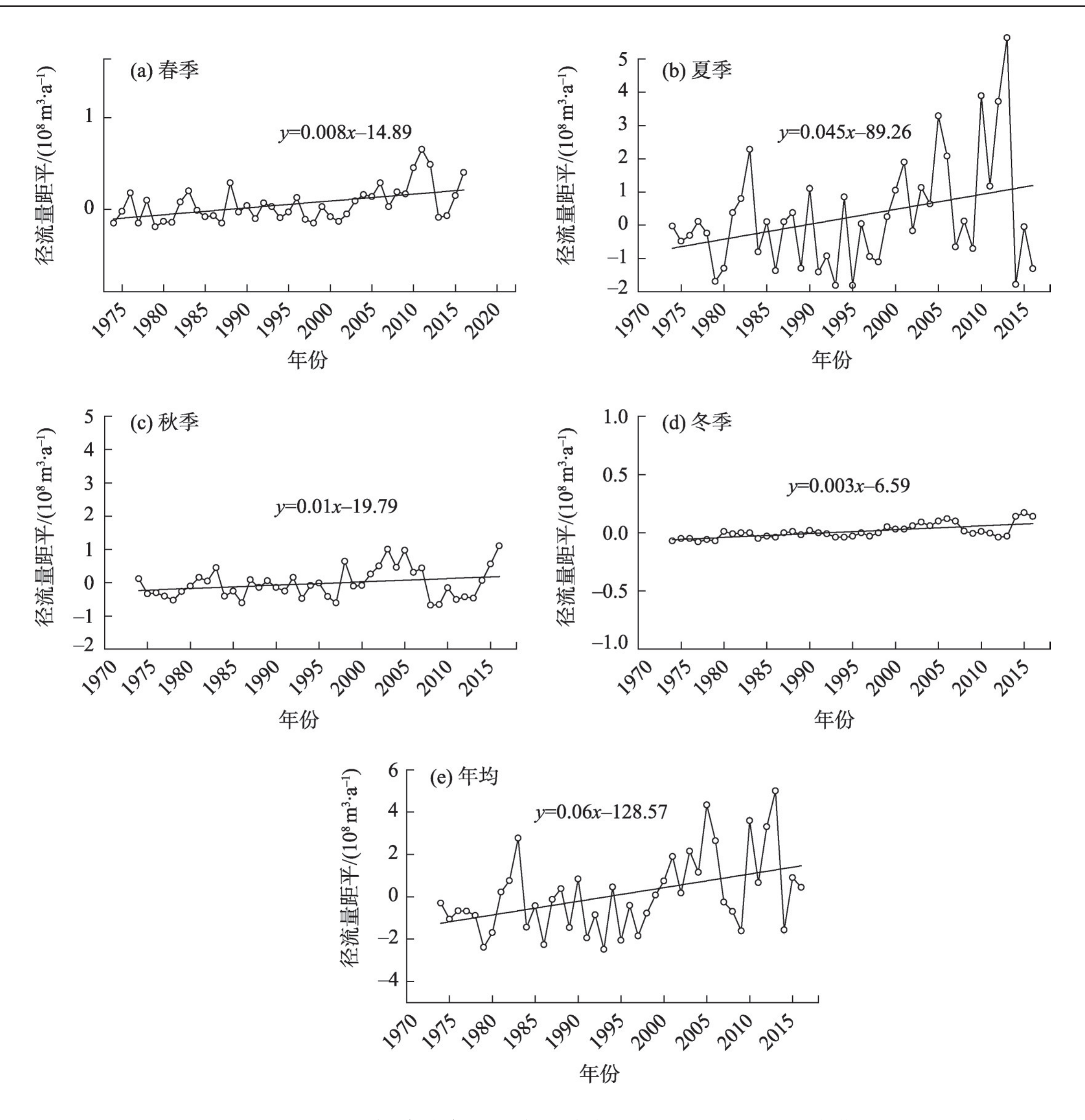


图4 过去30 a提孜纳甫河流域不同季节出山口径流量距平变化

Fig. 4 Time series of annual and seasonal runoff anomalies in the past 30 years

表3 提孜纳甫河流域过去30 a径流变化特征统计

Tab. 3 Runoff change rates and step change points in the past 30 years

类型	C_v	变化率/($10^9 m^3 \cdot a^{-1}$)	突变点(年)	比例/%
年径流	0.18	0.06	1998**	
春季径流	0.31	0.008	None	5
夏季径流	0.17	0.045	1998*	79
秋季径流	0.34	0.01	1997**	13
冬季径流	0.20	0.003	1996**	3

现出富集，这可能是季节融雪及冻土融水下渗导致。与大多数内陆河流一样，提孜纳甫河河水的氢氧稳定同位素表现出显著的季节变化，其中$\delta^{18}O$的取值范围为−9.15‰~−6.88‰而δD的取值范围为−56.00‰~−37.77‰。其$\delta^{18}O$的最低值出现在4月，最高值出现在春季的3月，而从9月开始$\delta^{18}O$表现出一种增加的趋势(图5)。

3.4.2 径流组分特征 近年来，塔里木盆地西南部呈现出显著的增温增湿趋势，这势必会引起高寒内陆河流径流组分的变化，为了解径流量对于气候变化的响应程度，该研究基于流域内的多种水体稳定同位素及水化学参数，利用同位素径流分割的方法，详细的解析了提孜纳甫河流域的径流组分特征。研究结果表明[6-8,22-25]，中国西北干旱内陆河流域径流主要是由山区降水、冰雪融水以及包含裂隙基岩水在内的地下水构成，不同的流域由于地质地貌类型以及所处的纬度不同，其径流组分特征不尽相同。基于同位素径流分割的结果，本研究详细计算了提孜纳甫河流域在研究期内(3—11月)降水、

表4　提孜纳甫河流域不同水体氢氧稳定同位素及总矿化度参数

Tab. 4　Water samples and their monthly mean isotope and chemical measurements

月份	河水				降水				地下水				融冰雪水(河冰)			
	δD /‰	$\delta^{18}O$ /‰	TDS /(mg·L^{-1})	*N*	δD /‰	$\delta^{18}O$ /‰	TDS /(mg·L^{-1})	*N*	δD /‰	$\delta^{18}O$ /‰	TDS /(mg·L^{-1})	*N*	δD /‰	$\delta^{18}O$ /‰	TDS /(mg·L^{-1})	*N*
1					−19.9	−25.74	70	1								
2					−115.45	−15.2	75	6								
3	−39.07	−6.88	410	6	−96.16	−13.34	70	2	−63.2	−9.3	715	2	−28.05	−5.38	170	2
4	−55.44	−9.15	412	6	−87.89	−11.72	110	1	−39.06	−7.72	720	2	−28.52	−5.5	174	2
5	−56	−8.94	400	6	−78.37	−10.09	120	4	−41.24	−7.56	715	2	−41.2	−7.87	150	2
6	−49.14	−8.54	370	6	−44.21	−7.2	120	1	−41.24	−7.57	730	2	−79.9	−10.24	170	2
7	−47.84	−8.18	370	6	−33.27	−5.97	120	4	−49.91	−8.54	740	2	−121..30	−12.22	160	2
8	−37.77	−7.31	380	6	−27.45	−4.79	130	5	−58.01	−9.3	725	2	−115.2	−11.35	170	2
9	−39.33	−7.24	390	6	−30.62	−5.47	119	4	−60.23	−9.4	720	2	−80.9	−10.49	160	2
10	−38.66	−7.01	400	6	−112.48	−14.94	110	1	−61.1	−9.45	715	2	−28.32	−5.3	170	2
11	−39.2	−7.24	400	6	−194.34	−24.41	110	1	−61	−9.4	715	2	−29.85	−5.71	170	2
12	–	–	–	–	−194.11	−24.31	80	2	–	–	–	–	–	–	–	–

注:*N*为样本数。

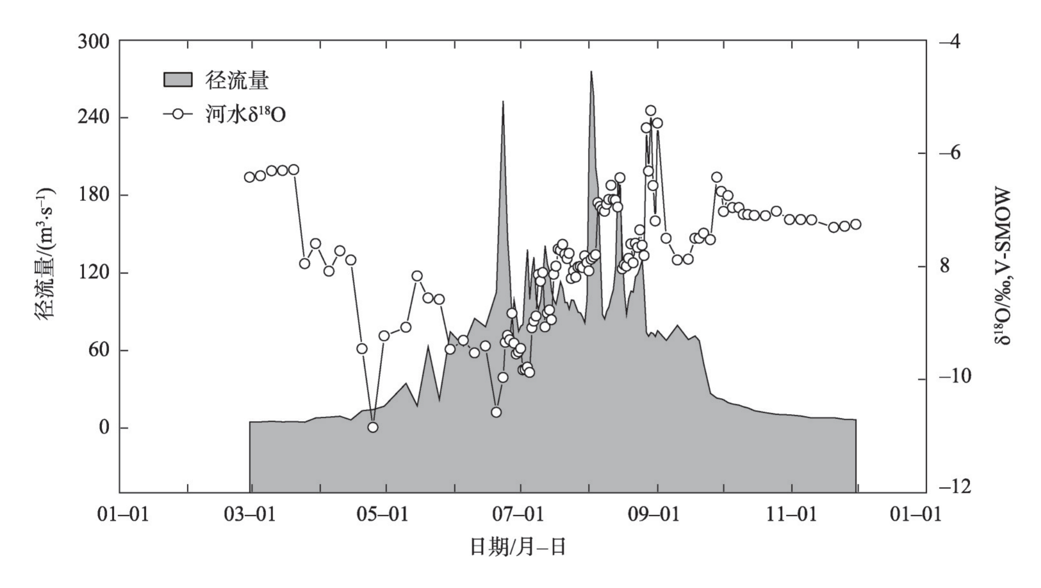


图5　提孜纳甫河流域研究期内(2016年3—12月)河水$\delta^{18}O$与径流关系

Fig. 5　River water $\delta^{18}O$ and runoff discharge measured at the Jiangka station from March to December in 2016

冰雪融水以及包含裂隙基岩水在内的地下水等对于流域径流的贡献补给量。由图6可知,提孜纳甫河流域径流中降水和地下水的贡献量从3—7月呈现出1个明显的上升趋势,随后贡献量开始下降。冰雪融水的贡献量在观测月份中呈现出双峰模式即:7月和10月均表现出峰值,7月的冰雪融水量峰值主要是由于夏季大量的高山冰雪融水汇入导致,而10月则可能由于季节降雪融化(地表温度此时仍不利于雪的积累)汇入引起。比较发现,6—9月该流域河川径流中降水的贡献流量高于同时期的地下水贡献流量。而4—5月,地下水径流的贡献流量高于降水和融冰雪水。融冰雪水径流贡献流量在3月、10月及11月为同时期最高。分析结果显示该流域年内径流组分变化较为复杂,对气温及降水的波动变化较为敏感。

利用同位素径流分割的结果,结合每个季度的径流量我们计算了不同季度径流的组分特征,图7中显示了3种主要的水源不同季节对于提孜纳甫河径流的贡献率。在春季(3—5月)提孜纳甫河流域径流中冰雪融水的贡献率达到38%,而秋季融雪期

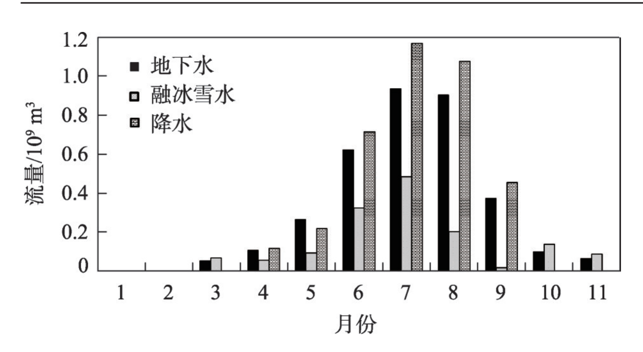


图6 提孜纳甫河流域径流地下水、降水、融雪水贡献流量逐月变化

Fig. 6 Monthly contributions of groundwater, precipitation, and meltwater to stream discharge in the Tizinafu River

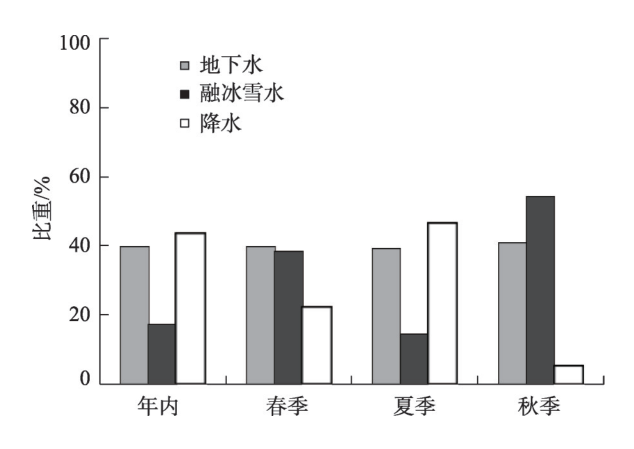


图7 提孜纳甫河流域不同季节地下水、降水及融冰雪水对河水的贡献

Fig. 7 Annual and seasonal contributions of groundwater, precipitation, and meltwater to stream discharge in the Tizinafu River

(9—11月)这一比重更大,其贡献率高达54%。在夏季(6—8月),有47%的夏季径流来自于降水,这一时期降水成为河流的主要水源;包含裂隙基岩水在内的地下水对于夏季河流亦有较大的贡献率(40%)。结合全年的径流量,加权径流量的贡献率结果可知,该流域年内径流中降水的比重最大达到43%;其次是地下水,为40%。冰雪融水作为一个重要的水源对于整个提孜纳甫河径流的贡献率为17%。

4 讨 论

根据研究结果,提孜纳甫河径流受融冰雪水、地下水及降水联合控制,夏季为降水的主要发生期,降水的年际波动是造成流域径流年变化的主要原因。如果按照当前的气候变化趋势,到2100年,该流域年降水量将增加40.5 mm,气温上升2 °C,与之对应的径流量将增加$0.63\times10^9\ m^3$。李兰海等[20]采用Delta方法对24个GCMs模型月数据降尺度分析了A1B、A2和B1三个情景下新疆区域未来气候变化格局,结果显示提孜纳甫河流域在未来3种气候情景下气温将分别增加3.23 °C、4.58 °C、2.68 °C,降水将减少7.30%、7.02%、7.25%。过去几十年,提孜纳甫河流域山区降水增加了52%,气温增加了0.9 °C,这一变化导致径流增加了30%。径流分割的结果显示,提孜纳甫河径流中降水和冰雪融水(受控温度)的比重为42%和17%。假定径流组分不变,该流域气温上升1 °C径流将增加5.7%;降水增加1%径流将增加0.24%。假定这种径流对气候响应模式不变,提孜纳甫河流域未来3种气候情景下到2100年径流量将会增加16.66%、24.42%、13.54%。

提孜纳甫河流域作为塔里木河流域重要的支流,其水资源是塔里木盆地西南缘绿洲农业及当地经济社会发展的重要资源保证,其水资源的安全调配是维系整个塔里木盆地西南缘绿洲稳定的重要保证。径流组分研究显示,该流域年径流中降水的比重较大,占到43%。流域径流对于降水的变化响应更为显著。在流域水资源管理和使用过程中应该充分考虑未来降水的变化对于整个流域径流量的影响,对于未来气候变化尤其是区域降水可能变化应及时制定应对政策;加强流域灌溉及生活用水的合理调配以及相应的保障性水利设施的建设等,从而更好的应对区域气候变化对流域水资源安全可能带来的影响。

5 结 论

(1) 过去60 a,提孜纳甫河流域气温显著升高,降水在山区增加明显,受此影响,径流量表现出增长的趋势,其中夏季径流增加最为显著。

(2) 径流组分的结果显示,提孜纳甫河流域冰雪融水、地下水及降水对于年径流的贡献率分别为17%,40%及43%。

(3) 径流组分特征季节差异显著,其中夏季径流中降水所占比重较大,年径流变化对降水的变化响应显著,未来气候变化尤其是降水的波动可能会对该区域径流产生显著影响。

参考文献(References):

[1] 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生

态风险分析——以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 410-419. [Zhang Xuebin, Shi Peiji, Luo Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 410-419.]

[2] Chen Z, Chen Y, Li W. Response of runoff to change of atmospheric 0 °C level height in summer in arid region of Northwest China [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(9): 1533-1544.

[3] Chen Y, Txkeuchi K, Xu C, et al. Regional climate change and its effects on river runoff in the Tarim Basin, China[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(10): 2207-2216.

[4] 孔彦龙, 庞忠和. 高寒流域同位素径流分割研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 619-625. [Kong Yanlong, Pang Zhonghe. Isotope hydrograph separation in alpine catchments: A review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 619-625.]

[5] Li B, Chen Y, Chen Z, et al. Trends in runoff versus climate change in typical rivers in the arid region of Northwest China[J]. Quaternary International, 2012, 282: 87-95.

[6] Sun C, Chen Y, Li X, et al. Analysis on the stream flow components of the typical inland River, Northwest China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61: 970-981.

[7] Sun C, Li W, Chen Y, et al. Isotopic and hydrochemical composition of runoff in the Urumqi River, Tianshan Mountains, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 1521-1537.

[8] Sun C, Chen Y, Li W, et al. Isotopic time-series partitioning of stream flow components under regional climate change in the Urumqi River, Northwest China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61:1443-1459.

[9] Buttle J. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins[J]. Progress in Physical Geography, 1994, 18(1): 16-41.

[10] Kendall C, Coplen T. Distribution of oxygen-18 and deuterium in river waters across the United States[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(7): 1363-1393.

[11] Burns D. Storm flow-hydrograph separation based on isotopes: The thrill is gone-what' s next[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(7): 1515-1517.

[12] Zhang Y, Song X, Wu Y. Use of oxygen-18 isotope to quantify flows in the upriver and middle reaches of the Heihe River, Northwestern China[J]. Environmental Geology, 2008, 58: 645-653.

[13] Zhao L, Yin L, Xiao H. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 5656 (1): 58-67.

[14] Kong Y, Pang Z. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge[J]. Journal of Hydrology, 2012, 434: 121-129.

[15] Chen Z, Chen Y, Li B. Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff for Kaidu River Basin in arid region of Northwest China[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2013, 111: 537-545.

[16] Sun C, Li X, Chen W, et al. Climate change and runoff response based on isotope analysis in an arid mountain watershed of the Western Kunlun Mountains[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 62: 319-330.

[17] 赵良菊, 尹力, 肖洪浪, 等. 黑河源区水汽来源及地表径流组成的稳定同位素证据[J]. 科学通报, 2011, 56(1): 58-67. [Zhao Liangju, Yin Li, Xiao Honglang, et al. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(1): 58-67.]

[18] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9. [Cheng Yaning, Yang Qing, Lou Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9.]

[19] 郝玥, 余新晓, 邓文平, 等. 北京西山大气降水D和^{18}O组成变化及水汽来源[J]. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1211-1221. [Hao Yue, Yu Xinxiao, Deng Wenping, et al. The variations of hydrogen and oxygen compositions and moisture sources in the precipitation in western Mountain areas of Beijing[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(7): 1211-1221.]

[20] 李兰海, 白磊, 姚亚楠, 等. 基于IPCC情境下新疆地区未来气候变化的预估[J]. 资源科学, 2012, 34(4): 602-612. [Li Lanhai, Bai Lei, Yao Yanan, et al. Projection of climate change in Xinjiang under IPCC SRES[J]. Resources Science, 2012, 34(4): 602-612.]

[21] 李斐, 刘苗苗, 王水献. 2001—2013年开都河流域上游积雪时空分布特征及其对气象因子的响应[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1160- 1168. [Li Fei, Liu Miaomiao, Wang Shuixian. Change in snow coverage and responses to climate change from 2001 to 2013 in the upper reaches of Kaidu River Basin[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1160-1168.]

[22] 桂娟, 李宗省, 冯起, 等. 祁连山古浪河流域径流组分特征[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 918-925. [Gui Juan, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Characteristics of runoff components in the Gulang River basin of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 918-925.]

[23] 李宗省, 冯起, 李宗杰, 等. 祁连山北坡稳定同位素生态水文学研究的初步进展与成果应用[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1044-1052. [Li Zongxing, Feng Qi, Li Zongjie, et al. Ecohydrology based on stable isotope tracing in the northern Qilian Mountains: Preliminary progress and its applications[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1044-1052.]

[24] 桂娟, 王旭峰, 李宗省, 等. 典型冰冻圈地区植被变化对人类活动的响应研究——以祁连山为例[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1235-1243. [Gui Juan, Wang Xufeng, Li Zongxing, et al. Research on the response of vegetation change to human activities in typical cryosphere areas: Taking the Qilian Mountains as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1235-1243.]

[25] Sun C, Chen Y, Li J, et al. Stable isotope variations in precipitation in the northwesternmost Tibetan Plateau related to various me-

teorological controlling factors[J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 66-78.

[26] Sun C, Chen W, Chen Y, et al. Stable isotope of atmospheric precipitation and its environmental drivers in the eastern Chinese Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124404.

[27] 桂娟, 李宗省, 冯起, 等. 祁连山古浪河流域径流组分特征[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 918-925. [Gui Juan, Li Zongxing, Feng Qi, et al. Characteristics of runoff components in the Gulang River basin of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(4): 918-925.]

[28] Li Z, Qi F, L Z, et al. Climate background, fact and hydrological effect of multiphase water transformation in cold regions of the western China: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 33-57.

[29] Li Z, Gui J, Wang X, et al. Water resources in inland regions of central Asia: Evidence from stable isotope tracing[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 1-16.

[30] Sun C, Shen Y, Chen Y, et al. Quantitative evaluation of the rainfall influence on streamflow in an inland mountainous river basin within Central Asia[J]. Hydrological Sciences Journal, 2018, 63 (1): 17-30.

Stream component characteristics of the inland river basin of the Tarim Basin under regional climate change

SUN Congjian, CHEN Wei, WANG Shiyu

(College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

Abstract: Climate change has a significant impact on the water cycle in the alpine region of Central Asia, which intensifies the disparity between the supply and demand of regional water resources. Understanding the characteristics of runoff components in regional inland rivers is of great importance for water resource management. Based on meteorological data and runoff data from the Tiznafu River Basin in the southwest of the Tarim Basin from the past 60 years (1957-2016), regional climate change and runoff responses were evaluated in this study. Results showed that the temperature of the whole basin and the precipitation in mountainous areas had an obvious upward trend; moreover, the regional warming and humidification trends had become more pronounced since 2010. Given these changes, the runoff of the Tiznafu River had increased significantly in summer and autumn, although there was no significant change in spring. Using isotope samples, we investigated variation in isotopes in different water sources and analyzed the contribution of different water sources based on isotope hydrograph separation. Melt water, groundwater, and rainfall contributed 17%, 40%, and 43% of the annual stream flow, respectively. There were obvious differences in runoff components in different seasons and the contribution of precipitation to runoff was more substantial in summer. As a typical alpine inland river in the southwest of the Tarim River Basin, regional climate change, especially changes in precipitation, will greatly affect the utilization of the Tizinafu River and its resources in the future.

Keywords: Tiznafu River Basin; climate change; runoff; isotope; hydrograph separation; Tarim Basin